

松 山 大 学 論 集  
第 27 卷 第 2 号 抜 刷  
2015 年 6 月 発 行

# 人工知能の応用による 生産ライン用群知能ロボットの研究

松 田 圭 司

# 人工知能の応用による 生産ライン用群知能ロボットの研究

松 田 圭 司

## 第 1 章 緒 論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 群知能ロボット研究の現況

今や人工知能が様々な分野で応用が研究されているが、人工知能は 50 年以上の長きにわたって研究されてきた。特にコンピュータの発展の節目においては、必ずと言ってよいほど、人工知能がブームとなってきた。

レスキューロボットやロボカップ<sup>[1.1]</sup>に見られるように、人工知能を応用した、能力を分散させて、トータルで最大限能力を発揮させることを目的とした群知能ロボットの研究も長年行われている。これは、1 台のロボットに能力を集約することによる能力的・物理的な限界、リスクへの不安および高性能ロボットへの急速なニーズの多様化・高度化への時代の要請と考えられる。<sup>[1.2]-[1.7]</sup>

群知能の概念は、昆虫のコロニーや他の動物の社会から発想を得た一般的なアルゴリズムや分散型問題解決システムをカバーできるようになった。<sup>[1.8]</sup>

当然のことながら、近年になり、Wi-Fi（無線 LAN）や Bluetooth, ZigBee などの高速・広帯域通信技術などの小電力通信技術の急速な発達などにより、より高度な通信機能を活用した相互間のコミュニケーション能力を有する群知能ロボットシステムへ発展しつつある。

近年のクラウドコンピューティングに代表されるような大容量情報ネットワークの拡充は、情報伝達路として目覚ましい発展を遂げている。この発展は、ロ

ボットの遠隔操作にも活用され、人間－機械系のシステムとして、さまざまな方面で実用化されている。さらに、ネットワークメディアを機械（ロボット）－機械（ロボット）の組み合わせに適用した新しい自律システムの研究も進められている。これらはネットワークロボティクスとよばれ、新規に研究が進められている<sup>[1,9]</sup> この研究により、人間もしくは管理機能を有したロボットが作業ロボットに指令を送信し、情報を一箇所に収集する従来型の集中制御方式から柔軟な分散型の制御方式への変化が期待される。

ネットワークを利用したロボットシステムとして、具体的には、遠隔操作を用いたロボットの研究は長年進められており、すでに原子力施設、海中作業および爆発物等のハンドリングのためのロボット等は実用化されている。また、先般、小惑星「イトカワ」を探索した「はやぶさ」など宇宙空間での自律型探索用ロボットも活躍している<sup>[1,10]</sup> 宇宙空間での Wi-Fi 導入や、小菅らが進めている通信時間遅れの研究<sup>[1,11]</sup> の発展とともに、これらはテレロボティクスという分野で継続的に発展するものと思われる。

ところで、コンピュータネットワークのインターネットの世界では、すべてのホストの情報を集中管理しているようなコンピュータは存在しない。局所的な複数台のホストの情報を管理しているコンピュータが世界中のあちこちに分散している。それにもかかわらず、インターネットでは任意のホスト間での情報伝達が瞬時に行うことが可能である。新しいホストの追加、撤去などといったことも、RIP や OSPF のような自律的ルーティングプロトコルの活用により、ネットワーク全体に影響を与えることなく可能である。

インターネットを構成するネットワークノードが自律的に構成の変更に対応するように、自律した個々の主体が多数集まって、相互に依存し合っているシステムをマルチエージェントシステムと呼ぶ<sup>[1,12]</sup> マルチエージェントシステムの設計パラダイムは、近年になり複雑系と呼ばれる考え方が注目されるようになって、重要視されてきている。このような、複雑系に関する研究や、群知能ロボットシステムの研究は、これらのマルチエージェントシステムに見ら

れる特徴を取り込み、エージェントとしてロボットを機能させることにより、新たな群知能ロボットシステムの概念を創り出そうとしている。その中で、注目すべきは群知能の創発性の実現である<sup>[1.13]</sup>。創発とは、あらかじめ設計された機能だけでなく、エージェント間の相互作用や学習などによる進化を元にして、新たな機能を発現させることを指す。

これまでに、群知能ロボットにおける創発性の実現をめざし、どのようにすれば人間あるいは自然界のさまざまな生態系に見られる創発的現象をシミュレーションでできるかといった議論が従来から数多くなされている<sup>[1.13]~[1.14]</sup>。

群知能ロボットによる創発性の研究において、現状の研究では、とりあえず複数のロボットをネットワークメディアに接続して、ハードウェアの動作確認程度にとどまっているのが現状である。

一方で、群知能ロボットとしての側面に着目して、群知能ロボットシステムが超音波、赤外線、接触、視覚等の多くのセンサの活用により、単なるナビゲーションに終わらず、高レベルのタスクを実行するために、各エージェントが取得した知識を分散配置および共有するための研究が進められている<sup>[1.15]</sup>。

エージェントが獲得した知識をホストによる集中管理とした場合、エージェント数の増加に対して情報の収集、管理、検索などのコストが指数関数的に増加する。その解決のために、集中管理ではない分散型システムにおける情報の分散的管理手法が求められている。

分散型システムの実現にむけて、エージェントが獲得した知識および環境情報そのものをエージェント化するために、知的情報処理機能を有するデータキャリア (IDC) による情報の共有システムの開発が行われた<sup>[1.16]~[1.18]</sup>。エージェントが獲得した知識を1つの装置で集中的に管理した場合、知識量が増加したときに必要な検索が困難になるため、IDタグなどの非接触型のデータキャリアをエージェントの作業環境に配置し、分散的な知識の共有化手法が提案されている。このようなデータキャリアを用いたシステムは、膨大な物理的情報、蓄積された情報の内容や更新状況を把握するための冗長な管理システムが必要

となる。その解決手法として、あくまでロボットモジュールをエージェントとして位置づけ、知識はモジュール本体の記憶ストレージに保管され、知識が必要な際にリアルタイムに参照できる手法をとるべきである、これにより、データ専用の管理システムも不要となり、保管知識を検索する時間（コスト）も削減される。

以上、現在研究されつつある群知能ロボットが備えるべき能力および用件を列挙すると以下のようにになると考える。(Fig. 1.1 参照)

- (1) 進化型のアルゴリズム
- (2) モジュール化による高いメンテナンス性
- (3) 環境のセンシング能力
- (4) 高度なコミュニケーション能力
- (5) リアルタイムな群全体の状況把握能力

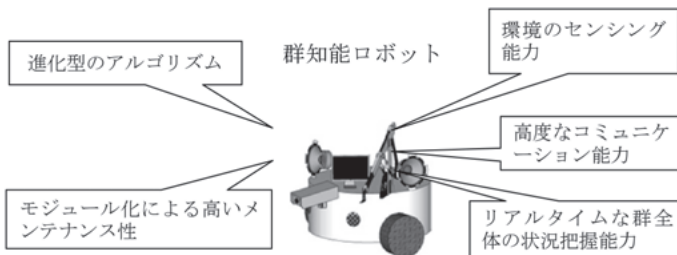


Fig. 1.1 Emergence of Multiple Robot System

### 1.1.2 製造工程における群知能ロボットの有用性<sup>[1, 19]</sup>

製造工程は、加工、組立、検査、および搬送・貯蔵のシステムとそれらの動作を統括する制御管理のシステムとからなっている。たとえば部品加工工程では、投入された素材に対して、各種の機械加工や材料処理を施して設計どおりの部品を製作する。後工程の組立てや検査工程を簡略化し、なおかつ要求され

る歩留率や製品品質を達成するためには、前工程である部品加工工程での段階で、品質の安定した部品を大量に製造する必要がある。特に、前述のように製品の機能が高度化することのみならず、市場での製品寿命サイクルが短期間化する先端技術製品の製造に対応するためには、製品の機能向上に追従した製造技術に対応してラインをその都度組み換え、なおかつライン作業に必要なシステムを再構築することは、時間がかかり、コスト高になる。

このような状況では、流れ作業式の分業システムを廃して、熟練作業者が多くの工程を一人で受け持つ多能工方式が適する場合もある。しかしながら、多能工とよばれる人材の育成には、同様に時間がかかり、育成のコスト増も予測される。また人間の手作業や、識別能力にはおのずと生産量の限界があり、最終的には機械もしくはロボットの導入を検討しなくてはならない結果となる。

このような製造工程における問題を、群知能ロボットシステムの適用により解決する場合、システム全体に必要と考えられる機能は次のとおりである。

(1) ロボットによる製造ラインの現況評価機能

新製品の製造指示を受けた時点で、新規の追加すべき工程、削除すべき工程および存続すべき工程の選択を行い、リストアップをする。また、生産性の評価もあわせて実施する。

(2) 自律的な行動計画の立案機能

前述の評価により、新規の工程を含んだ製造ラインを構築するための計画を立案する。各ロボット個体の行動計画も立案する。

(3) 工程編成行動機能

前述の立案に基づく行動を実施する。

(4) 行動後の評価機能

行動の実施後、目標とする製品の品質等の評価および生産性の評価をあわせて製造ラインのトータルな評価を実施する。

以上により、前述の製品の製造技術に対応した製造ラインの自律的な構築が可能となる。

### 1.1.3 マルチエージェントシステムの行動能力

製造工程での群知能ロボットのエージェントが備えるべき機能について論じる。具体的には、「自律エージェント-群全体」のインタラクティブな助け合いの機能を持たせることを提案する。たとえば、知識共有による助け合い項目として

- (1) 他のエージェントに対する判断結果や行動内容の修正
- (2) ノウハウの継承
- (3) データベースの共有
- (4) 搬送等の手伝い
- (5) 他のエージェントの修理

などが考えられる。これらの助け合い項目が実現されることにより、具体的に群ロボットがどのような行動が展開できるか解説する。<sup>[1, 20]</sup>

- (1) 他のエージェントに対する判断結果や行動内容の修正

これは作業を遂行する場合、自分以外のエージェントについて、荷崩れの予測や故障予測などの問題が発生したことに気づけば、これを該当するエージェントに知らせる機能である。エージェントが現実稼働していることを考えると、各エージェントは膨大な量の情報処理を行う必要性が予想できる。このため、情報処理の遅れにより、あるエージェントに、なにか問題が発生したとき、当該エージェントよりも先に、他のエージェントがその問題に気付くことが十分に考えられる。このような場合、先に気がついた方のエージェントは、問題を有するエージェントに報告し、問題エージェントはこの報告を受けてその後の行動や判断を行う。

また、次のような応用も考えられる。作業をともにするグループ内での、リーダー役となるエージェントの有無に関わらず、各々のエージェントが作業計画・実行提案者に対して、自身が作業をしやすように指示の変更を要請する。つまり、各エージェントは、現在自分がいかなる状況下にいるのかを逐一分析し、その分析結果から支持された作業内容に不都合

が生じた場合、計画実行者または計画立案者に対して訂正を要請する。

## (2) ノウハウの継承

これは、エージェントを解体・廃棄処分しなければならないときになっても、知識等を蓄積した頭脳の部分だけは、代替する新規エージェントに渡すことができる機能である。これは世代の異なるエージェントどうしの、情報による助け合いである。現世代のエージェントが学習・蓄積したノウハウを次の世代に継承することによって、新たに生成されたエージェント熟練技術を即座に使用することができる。

## (3) データベースの共有

エージェントには必ず記憶装置が装備されることが考えられるが、エージェントの外部に環境埋め込み型の記憶装置を配置する案もある。これにより煩雑に参照されるデータはエージェントが保有し、それ以外は外部の記憶装置に配置することも考えられる。

## (4) 搬送等の手伝い

他のエージェントの運搬作業において、搬送物の大きさや重量物等における不都合が生じた場合および搬送中の経路に障害物がある場合、他のエージェントが手を貸す行動が考えられる。また、これにより1つの搬送物を複数のエージェントが共同で運搬するシステムも構築できる<sup>[1, 21]</sup>

以上の機能をエージェントが持つことにより、製造工程でのエージェントは工程再編成行動を自律的に実行することが可能となる。

## 1.2 本研究の進め方

本研究では、高度なコミュニケーション能力を用いたエージェント間での知識の共有機能、エージェント間の自律的な行動能力を活用した汎用性の高いロボットの活用の可能性について検討を進める。

その手法として、ワイヤレス通信等のコミュニケーション機能を有したエー



ジェント間での取得知識の分散配置・共有化をはかる。その検証として、製造工程、とくにライン製造工程でのラインバランシング問題を取り上げている。

目標とするシステムとして、生産現場における群知能ロボットの適用を検討した。すなわち、近年の生産現場の変化を踏まえ、汎用性の高いFA向け群知能ロボットの導入を想定した。特に、ライン方式の組み立て工程に配備することを念頭に置いた移動式ロボットを想定する。

検証にあたり、FA向け群知能ロボットに求められる役割は大きく3つあげられると考える。

- (1) 工程管理ロボットとしてのネットワークを用いた一元化された監視業務
- (2) 既存生産システム・設備等の監視業務
- (3) 生産管理データの蓄積（内蔵型の大容量記憶装置など）による、工程のラインバランスおよび製品品質の管理

ここで想定する製造工程モデルとは、大きく材料の投入工程、組立工程、検査工程、修理工程および修理品の再投入工程、梱包および搬出工程から構成される。また、製造工程の基幹機能として、搬送（ロジスティクス）、および生

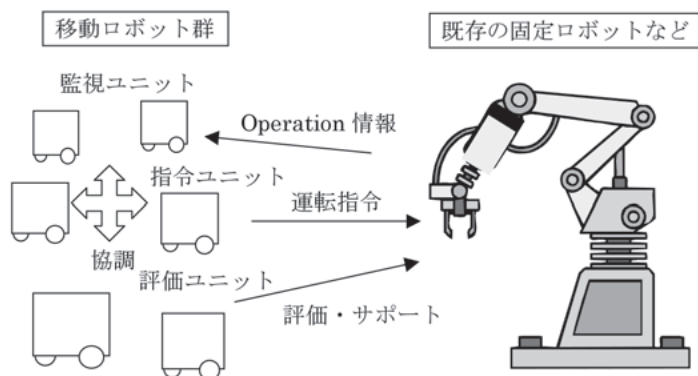


Fig. 1.2 Combination of Mobile Robots and Existent Facilities

産管理(材料管理, デリバリー, 歩留率の管理, 工数の管理, 生産コスト管理), 品質管理を想定する。

今回, 目標とするロボットは, 移動ロボット間でのさまざまな情報交換を行うことにより, 協調的な動作を行うだけでなく, 既存の固定式ロボットをはじめとするさまざまな設備の運転管理, サポートを実現する。Fig. 1.2 に目標とする群知能システムのコンセプトを示す。この図に表れているロボット群は既存のロボット群と今回新規に導入を図ろうとする移動ロボット(群知能ロボットシステム)である。移動ロボット群はこれらの間で協調的な自律的行動を実施するだけでなく, 操業に必要なデータや学習知識等を既存の固定ロボット等に伝達し, 指令を行うものとする。これにより, 既存のロボット設備の有効活用によるエージェント化も可能とする。

## 第2章 群知能ロボットシステム

### 2.1 群知能ロボットシステムの特徴

エージェントとは, 「環境に対して影響を与えることのできる自律的主体である。」と定義できる<sup>[2, 1]</sup>。主体とは, 人間を始めとする生物や, ロボットやソフトウェアの人工物を含め, それ自体で1個体を成すものである。また, 「自律的」とは, 自身の経験とそれが働く環境に組み込まれた知識の両方に基づいて行動できることを意味する。つまり, エージェントは環境の状態を知覚し, それに基づいて自身の判断で行動し, それによって環境に何らかの影響をあたえる。ここで, 環境とはエージェントを取り巻くすべてのものを指すと捉え, 他のエージェントも環境の中に含まれるものとする。

さらに, 群知能ロボットを定義するためには, ここで, 従来のマルチロボットシステムとの違いを明確にする必要がある。群知能ロボットは生体細胞の集合にたとえることができる。すなわち, 個々の細胞は他の細胞の協力なしに有用な仕事を実行できないが, 一方で従来のマルチロボットは個々のロボットが作業を行うことができ, 社会で生活する「人の集合社会」にたとえられる<sup>[1, 2]</sup>。

本研究では、製造工程を環境とみなし、エージェントが環境を学習し、他エージェントと協力し、集団的な自律行動により、生産性向上という「環境への影響」を生み出す群ロボットシステムの構築を検討する。(Fig. 2.1 参照)

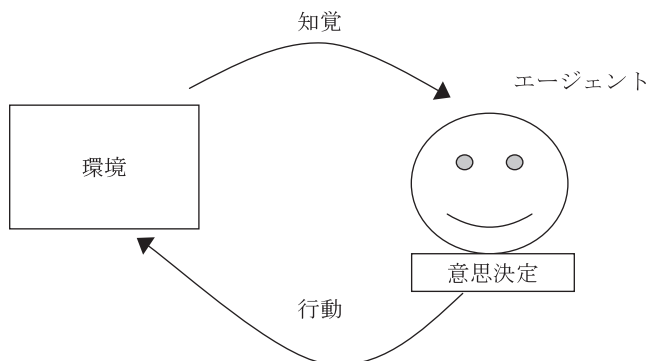


Fig. 2.1 Agents and Environment

群知能ロボットの特徴の1つとして、前述の生体細胞の例にたとえられるように、個々のエージェントは他のエージェントと協調的に仕事を進める必要がある。そのために指示系統が必ずしも集中制御方式でなく分散制御方式に依存することが多い。集中制御方式のもつリスクとして

- (1) 単一ホストによる命令式系統の障害時の全体への影響の甚大性
- (2) 単一ホストの誤指示による信頼性の低下
- (3) 簡略されたネットワーク構造による伝送システムの障害時における脆弱性

が挙げられる。このため、群知能ロボットシステムにおいては後述するような、耐故障性 (Fault Tolerance) に優れた分散制御方式を採用すべきと思われる。

この分散制御システムを採用した群知能ロボットにより以下の特徴が期待できる。<sup>[2, 2]~[2, 5]</sup>

- (1) 負荷分散：1台のエージェントの能力には限界があり、それを超えるタスクが集中した場合、その一部をシステム中の他エージェントにタスクを依頼することにより、作業負荷の軽減が可能となる。
- (2) 処理分散：特定の箇所で集中的に処理せずに、データの発生場所やサービスの要求場所などで処理を行うことにより、次のメリットが得られる。
  - (i) 通信コストの削減：データを特定のエージェント（ホスト）に送らずに、その発生場所に対応可能な処理をすることで送受信するデータ量が減少する。
  - (ii) サービスの向上：分散制御方式では、身近にあるエージェントと必要に応じて協調的な行動をとるので、応答時間が短くなるため、現場のタスク要求に合わせて、きめ細かい作業がリアルタイムで可能となる。
- (3) 機能分散：エージェントには多種・多様の機能が要求される。1つのエージェントがすべての機能を具備させることは、ロボットシステムの冗長化によるデメリットが出てくる。そこで、個別の機能をもつ専用のエージェントを用意して、システム全体で効果的なシステムを実現することが考えられる。
- (4) リスク分散：各エージェントが自律性を有するため、一部に不具合が生じてても、システム全体の機能停止を防ぐことができる。これは耐故障性（Fault Tolerance）として、システム維持において重要な特性である。

分散システムにおいては、一部に故障が生じた場合にも、ネットワークの経路が複数存在するため、故障したエージェント以外はシステムにおいて機能を失うことはなく、機能損失は最小限となる。また、エージェントの移動を容認したシステムにおいては、故障したエージェントの代替エージェントを配することが可能であり、故障した機能の修復も可能である。この点において、分散型のシステムは耐故障性において優位性を有していると考えられる。
- (5) 管理分散：異なる組織にまたがるシステムの場合、それぞれの組織の目

的や実情にあった形態、行動に応じて運用管理を組織ごとに柔軟に行うことができる。たとえば、本来異なる組織に所属しているエージェントが、その固有の機能を他の組織の業務に供することも可能となる。この場合は管理するエージェント間のネゴシエーションにより、所属エージェントの融通を実施することにより実現される。

- (6) 拡張性：想定されるタスクにより計算されるエージェント数により、エージェントを多く配置するなどの冗長性を付与することで、システムに柔軟性、拡張性を持たせることができる。あわせて、分散システムでは、要求が発生した場所に対応する機能の追加、技術の進歩の取り込みなどの拡張が行いやすい。

このように群知能ロボットシステムは、その分散性により様々な優位性を発揮するが、集中管理方式の利点も捨てがたい。実際、システム全体の意思決定を行う場合に、分散型ですべてのエージェントが意思決定権を持っていた場合、各々の意思が衝突し、統一した意思決定を得ることが難しいことがある。その点で、集中管理方式では、ホストがすべての決定権を有するために、常に単一の意思をシステムは持つため、円滑な意思決定が可能となる。

そのため、本研究では「集中管理方式」と「分散管理方式」の双方の利点を有した「ハイブリッドシステム」を提案し、その実現を目指すものとする。

## 2.2 ロボット間の情報交換

前節で論じたように、群知能ロボット間の通信機能は知識の伝達手段として重要な項目である。具体的には、各ロボットは、群全体もしくは一部の状況を把握するために「テーブル」と呼ばれるリアルタイムで更新されるデータベースを保有しなくてはならない。(Fig. 2.2 参照) そのためには、広帯域で高速な高信頼性の通信システムを構築する必要がある。

群知能ロボットシステムが円滑に、かつ、効率的に動作するための中心となる要素は、通信アルゴリズムとプロトコルに分類できる。通信アルゴリズムは

手続き的に構築され、内容は制御アルゴリズムと変換アルゴリズムがある。プロトコルは、ロボットとロボットが円滑にコミュニケーションするための約束事であり、通信を確立するために厳密に規定されなければならない。このような規定は OSI 参照モデルとして、基本的枠組みが規定されている。

エージェントがグループ全体で目標を掲げて、達成しようとする場合、グループ間で特定の通信手段が必要となる。エージェント間の通信としては、おおむね以下の 3 種の通信方法に分類される<sup>[2,6]</sup>

(1) P2P (Point to Point) 通信：相互通信 (Mutual Communication) とも呼ばれ、個別のロボットがお互いに通信を行う。通信における基本であるが、この概念の拡張により、3 者による 3 角通信なども行われる。この通信方式の問題としては、通信相手の特定方法である。以前は赤外線通信などでは、通信したい同士が向かい合うことでしか通信できなかったが、IP アドレスなど個体の

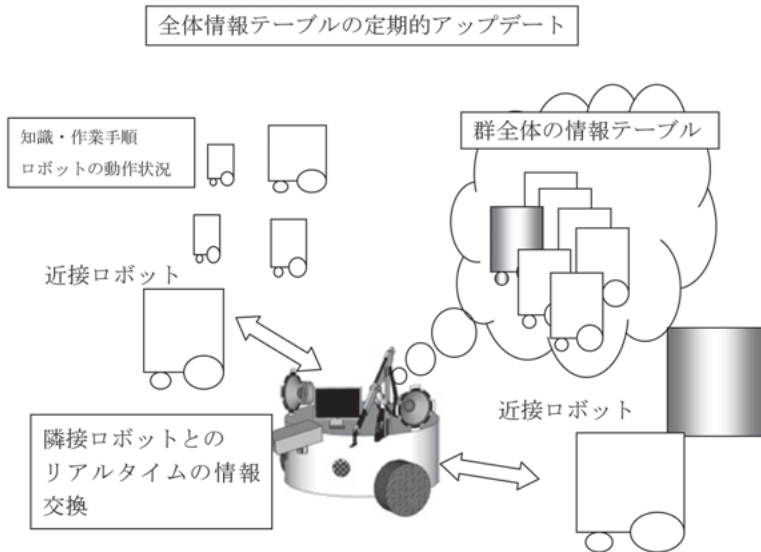


Fig. 2.2 Concept of Information Exchange among Agents

認識が可能となる概念の出現により、P2P通信が容易にできるようになった。さらにDHCPなどの技術により、新規にエージェントを追加した場合も、自動的にIPアドレスが割り振られ、通信が可能になるなどの拡張も可能となっている。

(2) ブロードキャスト (Broadcast) : 1つのエージェントから、複数のエージェントに対して、同時に同一内容の情報を発信する方法である。全体の作業テーブル変更や作業開始のタイミングあわせなど、システムを構成するすべてのエージェントが同一情報を共有する必要があるときに用いられる。

(3) 環境を介した通信 : これは、元来、通信技術が未発達であった頃に用いられていた「黒板方式」と呼ばれる方式に端を発すると考えられる。「黒板方式」を集中監視システムを例に説明すると、情報を発信したいエージェントがホストに情報を伝達し、他のエージェントはそれぞれサーバーに情報を確認する。この方式では、通信のすべての記録がサーバーに蓄積される利点があるものの、情報を伝達したい対象がいつ情報を獲得するかが不明であり、情報伝達に時間遅れが生じることになる。これは、情報確認のサイクルを短縮することで伝達速度の向上は可能であるが、サイクルを短くしすぎると、通信負荷が大きくなるため、サイクルの短縮には限界がある。そのため、通信技術の発達で、P2P通信が一般的になると、本方式は一時的に姿を消していた。

しかし、ロボットに対する要求が高度になるにつれて、移動ロボットがすべての環境情報を常に持ち歩くのではなく、必要なときに環境から情報を獲得する概念が提案されている。その1つとして近年提案されているセンサーネットワークのクラウドへの関係などは好例である。それはロボットが属する環境に暗黙的に埋め込むものである。これは昆虫・動物等のフェロモンの工学への応用として研究されたこともあり、近年のRFIDなどを応用したIDタグなどが群知能ロボットシステムへの応用が期待される。従来研究としてPaytonらの、フェロモンの軌跡の追跡から発想を得た移動ロボットの協調に対するアプローチを紹介する<sup>[2,7]</sup>。彼らのアプローチは「仮想フェロモン」の概念を用いたもの

である。これは単純なビーコン電波と各ロボットの上部に取り付けられた指向性センサを用いたシステムである。この場合の仮想フェロモンは、簡単なコミュニケーションと協調を促進し、ロボット内ではほとんど演算能力を必要としないほど単純なものであった。このシステムは昆虫の集団活動と同様に、ビルを通して、隠れた侵入者のもとまでの道を探索したり、重要な障害を発見したりするなど複雑なタスクを実行することができた。

このように、高度な情報交換や、他エージェントとの協調作業を行うには、高度なシステムの構築が必要であるばかりか、信頼性が高い広帯域の無線通信技術の適用が必要となる。現在多用されている無線 LAN や小電力通信システムの Bluetooth や ZigBee などが今後の代表的な技術として期待される。

### 2.3 進化するロボット

群知能ロボットシステムに期待すべき重要な要件は、「進化するシステム」の実現である。たとえば、あるタスクを複数の自律的なエージェントによって実行しようとするとき、そのタスクを効率よく実行しようとする個々のエージェントが、自律的行動の結果として、全体としての役割分担もしくは組織化のようなものが発生したとする。これは、創発の中での「進化」の良い一例といえる。

このように、創発型のシステムを実現するということは、「進化」するシステムを実現することと等価である。このため、前節で述べたように、今回検討する群知能ロボットは、「分散制御手法」と「集中制御手法」の両方を用いた「ハイブリッドな制御手法」を導入する。「分散制御手法」においては、ハードウェア間の情報交換に留まることなく、その情報を用いてロボット群が自律的に状況を把握して、最適化された群全体の判断を下すレベルの制御手法を備えなくてはならない。

前述の創発型のシステムを構築するためには、分散型システムの利点を用いて、群全体の組織がダイナミックにかつフレキシブルに変化する手順をもたせ



る必要がある。これにより、エージェント個体に個性・専門性を持たせた場合、最適の組織形態を構成することができる。その組織形態を最適化していくプロセスが「進化」の1つである。与えられた環境や条件の中で、それに適合してシステムを改良し、最適化させていくことで、システムの「進化」を実現する。将来的な群知能ロボットには、定期的にはエージェント個体の能力を「互いに競う」という概念を付加することを提案する。人間や組織が成長・発展する過程において、「競争」というイベントが大きな比重を占めているのは言うまでもない。「エージェント間の競争」の導入により、移動ロボット間の競争の結果、勝者は最終的な群知能ロボットの意思決定を行うリーダーとしての権限と機能を持つことができる。この際に、競争に敗れたエージェント個体は(1)敗因を自己分析し、(2)分析結果を自分で修復する。もしくはできない場合は、群の外部に修復支援を要求する、という2段階のプロセスを経て、個別の進化を遂げる。

これは創発型のシステムにおいて初期に保有している知識や機能を超えて新たな知見や機能を発現するために、このような進化する能力が不可欠である。ここで、留意すべき点は、エージェント個体の進化は必ずしも協調には反しないことである。

1.1.3で述べた群知能ロボット間の助け合いの機能は、エージェント個体の進化の上に成り立っている。最終的には、互いの知識や、ノウハウ、データベースの共有により全体システムとしての進化につながる。次項では、この進化型のシステム実現のための方向性について論じる。

## 2.4 進化型群知能ロボットシステム実現にむけて

研究を進めるにあたってハードおよびソフトの両面から取り組むべき項目として、

- (1) 群知能ロボットが持つべき機能の明確化
- (2) 知識の収集、分析・評価手順および分散配置手法

- (3) 意思決定手順
- (4) 群知能ロボットとしての学習項目
- (5) 自己組織化手順
- (6) 自己進化手順
- (7) ハードウェアのモジュール化

が挙げられる。

(1)については製造の現場においての実際的なニーズを検証する必要がある。それに応じて、(2)の知識の収集能力としての知覚機能、すなわち人間の「五感」に該当するセンシング能力もしくは識別能力を持たせる必要がある。その際に、後述するモジュール化が導入された群知能ロボットの利点は、1つのロボットに必ずしも複数の能力を持たせる必要はないということである。必要に応じて、段階的にモジュールを追加することで、比較的低コストかつ速やかな高機能化が図られる。また、あわせて検討すべきことは、収集した知識の分析、有用性の評価およびエージェント間での効率的かつ有機的な配置手法の検討である。この知識の評価、分散配置手法に関しては次章で論じることとする。(3)の意思決定手順は、エージェント個体の意思決定に終わらず、群知能ロボットシステムにふさわしい集団的かつ協調的な意思決定のアルゴリズムを構築する必要がある。(4)群知能ロボットとしてのニーズにより随時見直しが必要であるが、エージェント間での情報交換は、随時、定時的なアップデートにより実施され、なおかつ項目も通信負荷とのバランスを見極めて考慮する必要がある。

特に(5)、(6)の自己組織化手順および自己進化手順については、前項で論じたとおり、ロボットの「ロボット間の競争」階層的競合能力 (Winner takes it all) を持たせることによるロボット個体の進化・学習機能を加える。そのためには発展的に進化するプログラムを開発する必要がある。また、前述の競争による群ロボットの組織化には、リーダーの選定、すなわち動的なマスター・ロボットおよびスレーブ・ロボットの権利のハンドオーバー機能 (権限の移譲機能)

を与え、組織のリーダーもしくは意思決定者としてのロボットの選任が行われなければならない。

(7)ハードウェアのモジュール化は群知能ロボットシステムのハード的な特筆すべき特徴である。これにより、エージェントは環境のニーズにこたえる機能を低コストおよび短時間で実装することが可能となる。生産工程をトータルで管理しながら、なおかつ工程バランスを維持するためには、ロボットにかなりの汎用性、柔軟性が要求される。そのためには、ハードウェアのモジュール化による機能追加のフレキシビリティを実現する必要がある。加えて、モジュール化によりメンテナンス性の向上も期待できる。モジュール化については近年になり急速に研究が進められており、インターフェースの標準化が進展すれば、ロボットのモジュール化に一層の拍車がかかると思われる。たとえば日本ロボット工業会の提唱している ORiN<sup>[2,8]</sup> などはロボットのコントローラ内部データの情報交換の開放を行う標準化活動を促進するもので、今後の進展が期待される。ORiN は、ネットワークに接続された装置に統合的にアクセスするために必要なインターフェースを提供する。その1つにアプリケーションソフトから呼び出すコントローラ内データに対するアクセス・インターフェース(API=Application Program Interface)とそこで用いるデータ仕様がある。もう1つは、異なる仕様で作られたPC～装置間のメディア、通信プロトコルの違いを吸収する通信インターフェースで、他にもインターネット通信を可能とするプロトコルなども提供する。

ORiN 本来はロボットのみを最初の適用対象としたが、当初から幅広い産業用装置を適用対象とする“緩やかな標準化”のコンセプトの下で開発を進めたことにより、メーカー、装置、通信手段の違いを越え、アプリケーションソフトから統一的に装置内データにアクセスし、取扱いを可能とすることに世界に先駆けて成功している。現在、ロボットを始めとしてプログラマブル・コントローラ、NC 工作機などでの接続実績があり、さまざまな装置を統合的にアクセスできることが実証されている。これにより、1.2で論じた既存のロボット

システムと、移動ロボットを中心とした群知能ロボットとの共存が容易になると思われる。

### 第3章 群知能ロボットの知識の分散配置

#### 3.1 知識の有用性の定義

群知能ロボットシステムが、進化型のシステムとして、なおかつ協調的な作業のプランニングを迅速かつ正確に策定するには、収集したデータや知識ベースの集積と参照システムの構築が必要である。これにより、継続的な作業を通じて得られた経験的なデータの蓄積や、それを後に有効活用するために検索を行うことが可能となる。特に、ここでは蓄積された知識データが後の参照に最大限に有効活用可能となるような管理手法を考案するために、

- (1) 有用性評価
- (2) 知識の分散配置
- (3) 知識の共有
- (4) 知識の分類（カテゴリー化）および蓄積

について検討する。

新井, 吉田ら<sup>[3.1]–[3.3]</sup>は自律エージェントの単独の行動決定は局所的な情報が集中し、エージェントの情報処理能力に支障が発生すると論じている。その解決手法として、局所的データを分散化させ、エージェントのミッションドメイン（同一作業グループ）での共有化が考えられる。つまり、エージェントがセンサなどにより収集したデータは、そのデータを必要とするエージェント間で共有されることが望ましい。しかし、画像データなどの大容量データが、エージェント間で頻繁にやりとりされることは、通信コストを増大させる上、通信での時間ロスにより、協調作業に支障が出る可能性がある。そこで、群全体の効率的な取得知識の共有手法として、取得情報の有用性の定義づけを行い、適切な分散配置手法が必要となる。本章では、上記4点のなかで、有用性評価と知識の分散配置の2点について議論を行う。

本論文では知識の有用性を、以下の要素により定義する。

(1) 知識の参照頻度

知識の参照頻度は、どれだけその知識がタスクの実行に用いられたかの指標であり、タスク達成における重要性を示す。

(2) 知識の信頼性（同一知識の発生頻度とも置き換えが可能）

タスク実行に用いられる知識には、信頼性が求められる。信頼性の定義としては、文字通り正確性が挙げられるが、別の観点で見た場合、同一知識がタスク実行の際に繰り返し参照された場合、その知識には信頼性があると考えられるため、ここでは信頼性と同一知識の利用頻度を同等と考える。

(3) 知識の参照により削減されるコスト

知識の有用性の一指標として、コストの削減が挙げられる。タスク実行においては、時間コストあるいは費用コストなどのコストが発生する。これらを削減することは、特に現実的な応用においては重要視される。そのため、ここでは、削減されるコストを1つの要素として取り上げる。

いま、与えられたタスクを達成するために用いる知識  $K$  の有用性  $U_k$  を上記の要素から次式で定義する。

$$U_k = U_o + D_k \cdot C_k \left( F_k / \sum_{j=1}^n F_j \right) \quad (3.1)$$

ここで、 $U_o$  は知識の有用性の初期値を示す。すなわち、エージェントがタスクを実行する前に初期的に配置されるコストとする。 $C_k$  は知識  $K$  を使ってジョブを達成する際に削減されるコストとする。 $F_k$  は知識  $K$  を参照する頻度である。 $D_k$  は知識  $K$  が信頼できるかどうかの指標とする。式3.1では、初期値  $U_o$  に対して、さまざまな知識の参照のうち知識  $K$  を参照する頻度の比率を乗じたコスト  $C_k$  の値を知識参照による削減されたコストと考える。また、 $D_k$  を変数とすることにより、コスト削減試行に対する成功実績もしくは信頼性として反映することが可能である。

### 3.2 知識の分散配置

当システムの実現のためには、高性能なエージェントロボットの開発、エージェントシステムの実タスクへの適用性の検討および知識管理などの課題がある。特に知識管理は、エージェントの自律的行動をはじめとする、あらゆるシステムにおいて共通の前提課題として解決が必要である。具体的な知識管理としては以下の項目が挙げられる。

- (1) 知識の分散・共有：取得知識のカテゴリ化による階層的もしくは多次元的分散配置等の手法および知識の共有
- (2) 知識の蓄積：知識の分散・共有のための記憶媒体の構成および活用手法
- (3) 知識の通信手法：エージェント間データ伝送に用いる通信媒体およびコンピュータシステムとしてのエージェントネットワークの設計

本論文では、分散システムにおける有効な知識管理手法を提案すべく、主として、上記(1)の課題について議論する。

エージェントが知識共有をする場合、すべての知識が迅速かつ均一に各エージェントへ伝達されることが理想である。しかし、移動型のエージェントが保有しうる通信および記憶等のリソースは、固定式のエージェントに比べ、容量的に制約がある。そのため、これらの制約を考慮し、知識の分散形態を次の3形態で定義する。

[Case 1：共有] すべてのモジュールが同一の知識を共有（有用性  $U_k$  高）

このタイプの知識データは有用性が高く、頻繁に参照される。したがって、リアルタイムの参照が必要となる。またサイズも僅少であるため上位の階層に配置されるだけでなく、すべてのエージェントが同一のデータを保有することもある。

[Case 2：分散] データを取得したモジュールのみがデータを保有するが、他のモジュールはデータの所在や更新テーブル情報のみを保有し、必要に応じて参照または取得する。（有用性  $U_k$  低）

このタイプの知識データの有用性は比較的高いが、それほど頻繁に参照され

ることは少ない。したがって、中速度のストレージに保管されるか、特定のエージェントのみが保管しておき、他のエージェントは配置場所のみを知っておく程度にとどめる。

[Case 3: 共有的分散] 単一のファイルがマルチファイルの形態で複数のモジュールに分散配置され必要に応じて単一ファイルに復元される。(有用性  $U_k$  低)

このタイプの知識データの有用性は上記の2タイプに比べて低いものとする。参照頻度はきわめて低いものとする。この知識データの特徴としては巨大なデータであることで、単一のファイルが、ストレージの制約のために分割して配置される場合もある。このようなファイル管理は、分散ファイルシステムと呼ばれ、ファイルが複数のエージェントに分散しているシステムである。コンピュータシステムではすでに実用化されていて、UNIX 上の分散ファイル管理システムとして、NFS (Network File System) と RFS (Remote File System) が広く利用されている。

すなわち、実際にエージェントがタスク行動により知識を取得した場合、協調行動を実施するうえで有用性が高いものと評価されれば Case 1 を適用する。また、比較的低いものと評価されれば Case 2 もしくは Case 3 を適用する。しかしながら、タスクが進行の過程で有用性が向上するような場合は Case 1 へ移行する。また、低下した場合は Case 2, Case 3 への遷移もしくは記憶媒体からの抹消も選択可能とする。以上の分散配置のコンセプトを Fig. 3.1 に示す。

また以上のデータグループについて、参照頻度、重要度 (有用性)、データサイズについて3つのスケール化をした場合、適切なストレージ配置の指針について Fig. 3.2 に示す。これは、重要度が高く、データサイズが比較的小さくかつ参照頻度の高いデータグループは、データへのアクセスがより短時間で行われねばならない。よって、高速で単位記憶容量あたりの価格の高い高コストのストレージへ配置し、そうでないものは低速で低コストのストレージへ配置するという階層的な配置指針のコンセプトを図示したものである。これによ

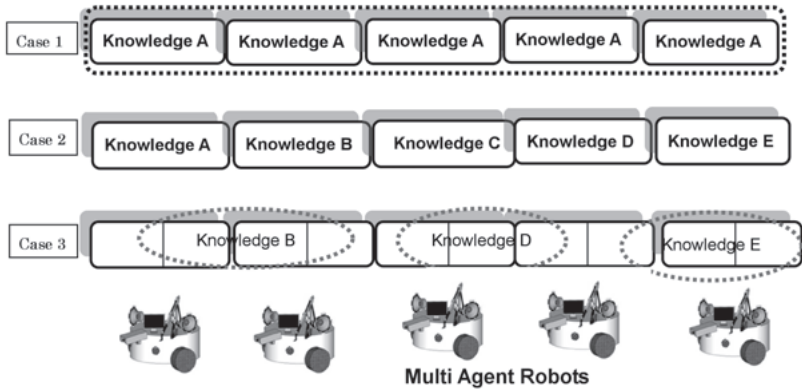


Fig. 3. 1 Configuration of the Knowledge Allocation by Usefulness

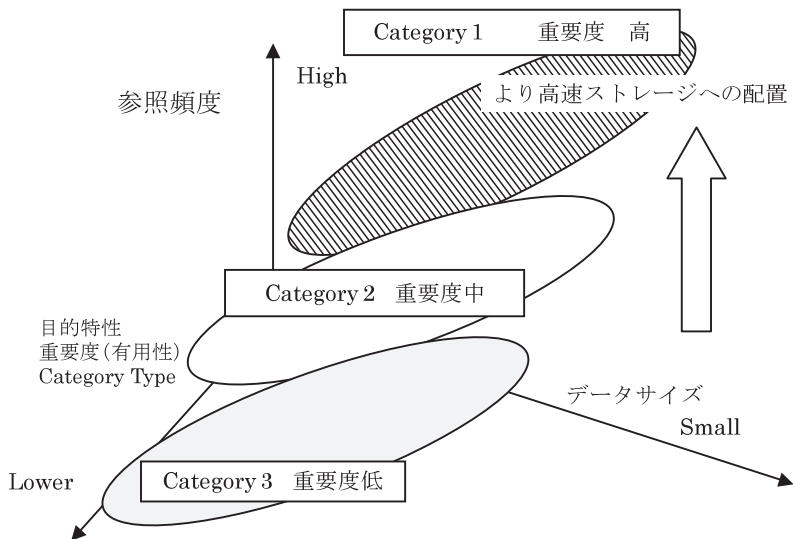


Fig. 3. 2 Configuration of the Storage for the Knowledge



り、ロボットの内蔵する記憶容量の経済的な最適化や論理的な配置の手法を決定することができる。

一般のコンピュータシステムと同様に、群知能ロボットシステムにおいても、時系列的にデータ量が増大し続けることは明確である。このため、多数のストレージ装置をロボットに搭載したうえで、大容量でかつ信頼性の高いシステムを安価に構築する必要がある。しかし、ストレージ装置数や記憶容量が増えることで、システムが複雑化し、データ管理が煩雑化するため、アクセス QoS の保障、容量の割当て、データの冗長性の管理等の管理コストが問題となると思われる<sup>[3,4]</sup>。その対策として、ストレージ装置毎に持つ計算処理能力を用いて負荷均衡化、要領均衡化、耐故障および柔軟な規模変更の機能を実現する研究もあわせて行わなければならない。

### 3.3 製造工程のための知識

いま、本論文で提案する知識の分散手法の有用性を検証するために、製造工程において群知能ロボットを適用した場合の生産性向上を例に用い、アルゴリズム作成のために共有対象とする具体的な知識について以下により定義する。知識としては、直接的に生産工程で参照されるもの、管理的に参照されるものおよび基準もしくは指針として参照される以下の3つのタイプに分別する。

#### (1) 製造手順知識 $Kp_n$

製造ラインでの中核となる最も重要な知識である。本論文においても工数削減のための知識が共有対象知識の1つとして位置づけている。知識の内容は製品の加工・組み立ておよび品質管理および製造全般の知識を含む。エージェント  $n$  が有する製造手順知識  $Kp_n$  を直接作業知識  $p_n$  と工数削減知識  $Rd_n$  により次式で定義する。

$$Kp_n = p_n + Rd_n \quad (3.2)$$

ただし

$$Rd_n = \sum_{i=1}^k Z_i \cdot U_i \quad (3.3)$$

とし、 $Z_i$  は獲得知識の有用性  $U_n$  からの変換係数で工数が削減した際に  $Rd_n$  が負数となるように定義する。これは本論文で扱う主要な知識であり、エージェントが製造作業を通じて、経験的に学習し、または人為的な入力により取得し、工数削減に供する知識である。具体的には、治工具等の活用、作業手順の簡略化および品質の安定化に伴う各工程における検査項目の簡略化などがあげられる。

## (2) 生産管理のための知識 $Ka_n$

この知識は前述の製造手順知識  $Kp_n$  に影響を与える生産活動の行動計画および記録である。生産活動の計画データ（計画生産数、目標材料歩留率、目標投入工数など）、材料管理データ（投入材料データ）、品質管理データ（材料不良データ、組み立て不良データ）、各データの計画値との差、生産データ生産台数、投入工数やセンシングデータ（学習記録）および隣接エージェントへの伝達情報記録などが考えられる。

## (3) 製造および生産管理のための参照知識 $Kr_n$

この知識は上記2つの主要な知識が必要に際し参照する基準データである。具体的には製造手順の評価結果や、行動記録の総合的なコンプライアンスとしての評価スケールなどである。例えば、作業手順を反復実施する場合、定期的の確認を行う場合の評価基準となるデータなどがあげられる。

Fig. 3.3 に上記の3タイプの知識の配置コンセプトを示す。

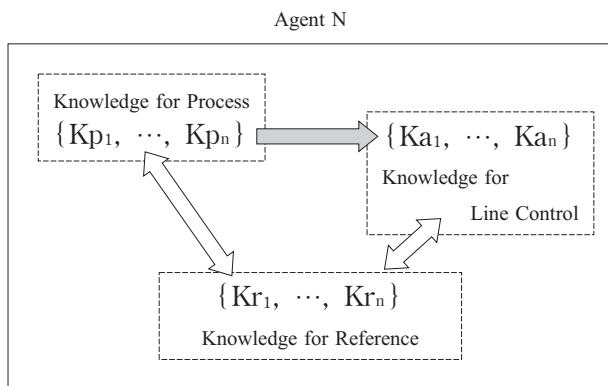


Fig. 3.3 Concept of the Knowledge for Manufacturing

## 第4章 ま と め

本論文では、群知能による複数ロボットシステムの有用性および必要とされる能力について論じた。合わせて協調的作業の計画を実施するためには、データや知識のデータベースの構築の重要性を論じた。特にロボットシステムで活用されるべき、取得知識の有用性を、知識の参照頻度および信頼性、知識の参照により削減されるコストにより定義した。また、有用知識を分散配置することにより、エージェントのミッションドメインでの共有化をはかり通信やストレージの有効活用をはかる。知識の分散配置についての携帯を、共有、分散、共有的分散と定め効率的な配置手法の提言を行った。

そして、製造工程に群知能ロボットシステムを配置した場合に、エージェントを適用した場合の生産効率向上を例に用いるための手法として知識の分散を論じた。知識を大きく、製造手順知識、生産管理知識、製造および生産管理のための参照知識と区分した。これにより、今後の研究に生かされるべき、有用知識の活用による生産性向上のためのシミュレーションのためのアルゴリズム作成の基幹とした。

## 参 考 文 献

- [1.1] Hiroaki Kitano: "RoboCup as Research Program", Proceedings of the 1997 Intelligent Robots and Systems IEEE/RSJ, 1997
- [1.2] Gerardo Beni: "自律分散ロボットシステムと群知能", 日本ロボット学会誌 10 巻 4 号, pp.457-463, 1992
- [1.3] 浅香, 石川: "動的な環境における自律移動ロボットの行動制御", 日本ロボット学会誌 12 巻 4 号, pp.583-589, 1994
- [1.4] Lee, Hashimoto: "Controlling Mobile Robots in Distributed Intelligent Sensor Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 5, pp. 890-902, 2003
- [1.5] 福田, 植山: "分散型ロボットシステム", 日本ロボット学会誌 10 巻 3 号, pp. 329-333, 1992 年 6 月
- [1.6] 福田, 石原: "マイクロマシンの自律分散制御", 日本ロボット学会論文集, Vol. 12, No. 4, pp. 531-536, 1994
- [1.7] 福田, 下島, 阿部, 田中幸, 田中祥: "室内作業移動型ロボット", 日本ロボット学会論文集, Vol. 13, No. 7, pp.916-919, 1995
- [1.8] Bekey: "自律ロボット概論", 毎日コミュニケーションズ, p. 359
- [1.9] 福田, 関山: "ネットワーク型ロボットシステム", 日本ロボット学会誌, 12 巻, No. 6, pp. 780-785, 1994
- [1.10] 広瀬, 塚越, 米田: "不整地における歩行機械の静的安定性評価基準", 日本ロボット学会誌, 16 巻, No. 8, pp. 1076-1082, 1998
- [1.11] 小菅: "ネットワークを介した環境予測型遠隔操作システム", 日本ロボット学会誌, 17 巻, No. 4, pp. 473-476, 1999
- [1.12] 大内, 山本, 川村: "マルチエージェントシステムの基礎と応用 - 複雑系工学の計算パラダイム -", コロナ社, pp. 1-3, 2002
- [1.13] 嘉数: "ロボティクスにおける創発と進化", 日本ロボット学会誌, 15 巻, No. 5, pp. 658-662, 1997
- [1.14] 太田, 新井: "群ロボットシステムと創発", 日本ロボット学会論文集, Vol. 15, No. 5, pp. 693-697, 1997
- [1.15] Cai, A., Fukuda, T. and Arai F.: "Information Sharing among Multiple Robots for Cooperation Cellular Robotic System", Proceedings of the 1997 Intelligent Robots and Systems IEEE/RSJ, Vol. 3, pp. 1768-1774, 1997
- [1.16] 浅間, 倉林, 嘉数, 藤井: "知的データキャリアによる群ロボットの機能創発", 日本ロボット学会論文集, 17 巻, No. 6, pp. 848-854, 1997
- [1.17] 前, 梅谷: "環境への知識埋め込みによる複数ロボットのナビゲーション", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 講演論文集, 1999
- [1.18] 前: "自律作業ロボット間における知的共有を目指した環境添付型記憶媒体の動的

配置”，日本ロボット学会誌，20巻，No. 6，pp. 631-639，2002

- [1. 19] 木村：“岩波講座 現代工学の基礎 製造システム”，岩波書店，pp. 37-41，2002
- [1. 20] 黒須誠治：“次世代生産システム－自律分散協調型の生産システム”，白桃書房，pp. 77-85，1997
- [1. 21] 平田，小菅：“ロボット間の幾何学的関係を必要とせず物体の搬送を実現する複数移動ロボットの分散強調制御”，日本機械学会論文集（C編），69巻，677号，pp. 204-211，2003
- [2. 1] 大内，山本，川村：“マルチエージェントシステムの基礎と応用”，コロナ社，pp. 1-3，2002
- [2. 2] Wang, Premvuti: “Resource Sharing in Distributed Robotics Systems Based on a Wireless Medium Access Protocol”, Proceedings of the IEEE IROS'94, Vol. 2, pp. 784-791, 1994
- [2. 3] 白鳥，滝沢：“分散処理，情報科学コアカリキュラム講座”，丸善，1996
- [2. 4] 長尾，松山，杉本，佐藤，麻生：“情報の組織化”，岩波講座マルチメディア情報学，2000
- [2. 5] 滝根，伊藤，西尾：“ネットワーク設計理論”，岩波講座インターネット，2001
- [2. 6] Bekey: “自律ロボット概論”，毎日コミュニケーションズ，pp. 359-361
- [2. 7] Bekey: “自律ロボット概論”，毎日コミュニケーションズ，pp. 355-356
- [2. 8] 日本ロボット工業会，<http://www.orin.jp/what.html>
- [3. 1] 新井，吉田：“複数ロボット系の局所的な通信に関する研究”，日本ロボット学会誌 12巻6号，pp. 886-891，1994
- [3. 2] 浅間，尾崎，石田：“通信を用いた分散的管理に基づく複数の自律型ロボットの協調的作業分担決定方法”，日本ロボット学会誌 10巻7号，pp. 955-963，1992
- [3. 3] 石田，浅間：“自律分散型ロボットシステムのための通信機器と設計と通信シミュレータの開発”，日本ロボット学会誌 10巻4号，pp. 544-551，1992
- [3. 4] 片居木，小林大，吉村，小林隆，田口，横田：“分散ストレージシステム上での複製を含むデータの分割配置とアクセススケジューリング”，電子情報通信学会 DEWS2006 論文集 7C-o5，2006